

Состояние и перспективы развития городского гибридного и электрического тягового электропривода в России

State and prospects of city hybrid and electric traction drive in Russia

Анучин А.С., к.т.н. Alecksey S. Anuchin, PhD.

Алямкин Д.И., к.т.н. Dmitriy I. Alyamkin, PhD.

Козаченко В.Ф., д.т.н. Vladimir Ph. Kozachenko, Dr.T.Sc.

Лашкевич М.М., к.т.н., Maxim M. Lashkevich, PhD.

Остриров В.Н., д.т.н., Vadim N. Ostrirov, Dr.T.Sc.

Аннотация

Рассмотрено текущее состояние в области тягового привода малой мощности для городского транспорта в России. Разобраны достоинства и недостатки действующих систем электроприводов московского метро и троллейбусов, произведен анализ ошибок, заложенных в структуру гибридной трансмиссии Ё-мобиля. Приведено сравнение типов электроприводов для тяги, предложена структура гибридного автобуса для городских условий эксплуатации.

Annotation

The state and prospects of electric traction drive for city vehicles in Russia are described. The strengths and weaknesses of existing systems of Moscow subway trains and trolleybuses electric traction drive are shown. The analysis of errors in hybrid transmission of Yo-mobile structure is given. The comparison of motor types was made and a structure of hybrid city bus is proposed.

Ключевые слова: тяговый электропривод, гибридная трансмиссия, городской транспорт.

Keywords: traction drive, hybrid transmission, city vehicles.

Введение

Долгое время тяговый электропривод в России ассоциировался, прежде всего, с двигателями постоянного тока с реостатным регулированием и переключением обмоток релейно-контакторной аппаратурой. Относительно недавно (около 20 лет назад) появились широтно-импульсные преобразователи для качественного и экономичного регулирования момента (тяги) на валу двигателей постоянного тока. Чуть позже появился асинхронный регулируемый электропривод в метро и троллейбусах. Затем наиболее амбициозный проект — Ё-мобиль, закрытый в апреле 2014 года.

Еще одной отечественной трансмиссией, прошедшей полный перечень испытаний и представленной видео-материалами с испытаний и подробным описанием принципов построения аппаратной и алгоритмической частей [1, 2, 3], является НИР «Крымск». Однако пока продолжение работ находится в подвешенном состоянии из-за неопределенности с возможными областями применения разработки.

В итоге мы имеем кучу прототипов и ни одного серийного проекта. Как получилось, что в России нет своих серийных гибридных и электрических трансмиссий? Что нужно для успеха в этой области?

Основные недостатки существующих решений

В действительности, мы имеем несколько серийных успешных решений, однако они, присутствуя на рынке, имеют недостатки, не позволяющие им конкурировать с современными образцами западной техники.

Метро

Начнем с тяговых электроприводов, устанавливаемых на вагонах московского метро последних модификаций. Данный электропривод построен по схеме «один преобразова-

тель частоты — 4 асинхронных электродвигателя». Схема была позаимствована у компании Alstom и в настоящее время морально устарела. Она имеет сразу несколько принципиальных недостатков.

Скалярная система управления не позволяет контролировать момент. При старте на почти нулевых скоростях отчетливо чувствуется вибрация. Данный недостаток не так значим для метро, однако это не позволяет использовать двигатели в режиме максимального момента при разгоне, а ведь пропускная способность метро в большой степени определяется скоростью покидания вагоном станции и готовностью принять следующий поезд.

Из-за разного диаметра колесных пар и разности в характеристиках тяговых двигателей неизбежно один двигатель оказывается более загруженным, чем другой. Данное обстоятельство не позволяет использовать двигатели с полной нагрузкой, а значит, они переразмерены и вагоны возят с собой «лишнюю» массу. Регулярная обточка колесных пар спасает лишь на время и не способна исправить разницу в механических характеристиках разных двигателей.

Вместе с тем, система вполне работоспособна и надежна, хотя характеристики можно было улучшить, запитав двигатели от индивидуальных преобразователей с системой векторного управления, обеспечивающей стабилизацию тягового усилия. Идеальным стал бы вариант с индивидуальным приводом на полуось, что существенно снизило бы износ реборд, однако это требует полной переработки конструкции тележки.

Троллейбус

Другая система с асинхронным электроприводом устанавливается на троллейбусы и уже долгое время успешно эксплуатируется.

Здесь недостатков значительно меньше. Можно ругать применение асинхронного двигателя в качестве тягового, но данное решение работает и применяется, в том числе, зарубежными производителями техники, поэтому не будем этого делать. Посмотрим на решение с другой стороны.

Представим себе Жигули 2107, который мы хотим сделать современным гибридным автомобилем. Для этого вместо бензинового двигателя установим гибридную силовую установку, бензобак частично заменим суперконденсаторами. Автомобиль поехал, но что-то не так.

Он остался по-прежнему старым и не удовлетворяет нашим эстетическим требованиям, проигрывает по аэродинамической эффективности и комфорту подвески. Именно так воспринимается решение с заменой тягового электродвигателя постоянного тока на троллейбусах асинхронным частотно-регулируемым электроприводом.

Механический дифференциал «уродует» современный троллейбус. Он не позволяет опустить пол в районе задних колес; нет систем помощи водителю; попав на лед, одно из колес буксует, и троллейбус теряет тягу.

Эффективным может быть лишь решение, гармонично объединяющее все лучшее во всех областях — кузов, подвеска, трансмиссия, аэродинамика и эргономика. Модернизация по кусочкам ничего не дает — техника не может конкурировать с западными аналогами. Подтверждением этому может служить огромный список недоведенных проектов, приведенный в [4].

Мертворожденный или «ошибка в самом начале»

Один из самых обсуждаемых проектов «Ё-мобиль» был закрыт в начале 2014 года. Это было ожидаемо и совсем не потому, что мы не верили в способности организаторов проекта, а из-за технических ошибок, допущенных еще на стадии эскизного проекта.

Говорить об ошибках можно лишь опираясь на опубликованные функциональные схемы трансмиссии автомобиля, однако они с большой вероятностью соответствуют реализуемым решениям, так как сложно предположить, что разработчики по каким-либо причинам намеренно пытались ввести кого-то в заблуждение.

Первое, что бросается в глаза — это применение синхронных машин с постоянными магнитами в качестве тяговых двигателей. Их подключение к колесам через механический дифференциал нами уже обсуждалось на примере троллейбуса, но в данном случае основной недостаток связан с применением постоянных магнитов.

Механическая характеристика синхронной машины с постоянными магнитами в режиме векторного управления близка к квадрат-

ной. Это значит, что мы получаем максимальную мощность на максимальной скорости. Скорость Ё-мобиля ограничена электроникой на уровне 130 км/ч, но правильнее было бы говорить «силовой электроникой». Очевидно, что 130 км/ч является той скоростью, когда ЭДС двигателя становится равной напряжению питания инвертора.

Конечно, синхронная машина с постоянными магнитами позволяет реализовывать режим ослабления поля, путем введения размагничивающего тока по оси d , однако этот режим ведет к росту потерь и весьма опасен [5]. Если произойдет отключение инвертора по какой-либо причине (например, сгорел источник питания драйверов), то ЭДС двигателя резко возрастет, что может привести к выходу из строя инвертора (под действием большого тока через обратные диоды) и пробоем элементов звена постоянного тока. Так что на практике ослабить поле более чем в полтора раза не получается. Отдельные компании предлагают решения с ослаблением поля в два раза [6], но нет ни каких данных об успешной эксплуатации и дополнительных элементах, вводимых в конструкцию для обеспечения электрической безопасности при сильном ослаблении поля.

Второй недостаток квадратной характеристики в том, что машина всегда едет на 5-ой передаче. То есть на максимальной скорости мы имеем тот же момент, что и на минимальной. Конечно, можно предусмотреть возможность форсировки момента на низких скоростях в полтора-два раза, но это не бесплатно и выливается в повышение массы и габаритов инвертора.

Если бы изобретатели Ё-мобиля проанализировали опыт зарубежных коллег, то обнаружили бы, что двигатели с постоянными магнитами устанавливаются только совместно с коробками передач или в тех транспортных средствах, где по условиям эксплуатации не требуется достигать хорошей динамики (например, вильчатые погрузчики и машинки для гольфа).

Второй интересный момент касается применения суперконденсатора. Он включен в буферный режим на звено постоянного тока, как и в [4]. Так делать нельзя. Рассмотрим почему.

Приступая к разгону автомобиля необходимо иметь полностью заряженный суперконденсатор. Он будет разряжаться в процессе разгона и, снизив свое напряжение в два раза, отдаст $\frac{3}{4}$ начальной энергии. Но в Ё-мобиле установлены тяговые двигатели с постоянными магнитами, а им, чтобы работать на высоких скоростях, нужно большое напряжение инвертора, но подключенный к нему суперконденсатор на половину пуст.

Предположим, что за счет работы ДВС и генератора мы все-таки зарядили суперконденсатор и звено постоянного тока инверторов

и разогнались до максимальной скорости в 130 км/ч. Хотим затормозить, но суперконденсатор полностью заряжен и энергию приходится рассеивать в механических тормозах. Опять с суперконденсатором что-то не так. Никак не получается его использовать, а проблема исключительно в структуре силового канала — в ней отсутствует жизненно необходимый преобразователь для обеспечения правильной работы суперконденсаторного накопителя.

Идеальный электродвигатель для тяги

Если неправильный выбор типа двигателя привел к неудаче в проекте Е-мобиля, то возникает естественное желание узнать, какой двигатель лучше всего использовать в гибридном и электрическом транспорте?

Как и следовало ожидать, однозначного ответа на данный вопрос нет, но можно попробовать определить сильные и слабые стороны всех имеющихся решений. Сначала попробуем определить граничные случаи.

Если в трансмиссии планируется применение коробки передач, то лучшего решения, чем синхронный двигатель с постоянными магнитами не найти, хотя масса данного решения в настоящее время начинает проигрывать прямому приводу на колесо [6]. Он имеет самый высокий КПД, хорошо управляем и вместе с коробкой передач, которая ограничивает требуемый диапазон регулирования, может использоваться в бездатчиковом режиме.

Однако следует помнить, что желательна иметь возможность механического расцепления электродвигателя от ведущих колес. Если двигатель будет постоянно связан с колесами, то в случае неисправности в трансмиссии транспортное средство можно будет буксировать только с полной или частичной погрузкой. Это хорошо видно на примере Toyota Prius, где производитель запрещает буксировку без погрузки передних колес. На скорости электромоторы развивают ЭДС, опасную для силовой электроники. Кстати, в случае пробоя изоляции в обмотке электромотора ЭДС, наводимая постоянными магнитами при буксировке, может привести к пожару.

Двигатель постоянного тока не следует рассматривать в качестве варианта для трансмиссии из-за наличия коллектора. Остается несколько типов машин для прямого привода на колесо.

Асинхронный электропривод широко используется в настоящее время, но имеет существенный недостаток, связанный с отводом тепла от ротора [5]. Потери в роторе требуют применения масляного охлаждения, с которым связан ряд проблем, таких как гигроскопичность масла и засорение форсунок металлической стружкой.

Синхронная машина с регулируемым возбуждением имеет преимущества перед асинхронным приводом в части диапазона ре-

гулирования в области ослабления поля, но содержит контактные токосъемные кольца.

Синхронная реактивная машина обладает преимуществом бесконтактности, хорошим диапазоном регулирования в зоне ослабления поля, но отличается низким $\cos(\varphi)$, что требует завышения габаритов инвертора как по сравнению с асинхронной, так и синхронной машиной.

Вентильно-индукторная машина с самовозбуждением (SRD) имеет хорошие тяговые характеристики, но все еще испытывает проблемы с отсутствием на рынке специальных силовых модулей под однополярное питание, а сильные вибрации приводят к преждевременному выходу из строя подшипников.

Вентильно-индукторная машина с независимым возбуждением еще находится в стадии поиска оптимальной конструкции, хотя большой путь уже пройден. Она сложнее в изготовлении, чем классическая вентильно-индукторная машина, но управляется от традиционного трехфазного инвертора, имеет синусоидальную ЭДС, а применение системы векторного управления позволяет стабилизировать момент. Вместе с алгоритмом высокочастотной идентификации положения по магнитной анизотропии можно исключить датчик положения ротора, что выгодно отличает данный тип привода от асинхронного. Машина обеспечивает широкую зону ослабления поля, однако еще остаются проблемы с замыканием магнитного потока по корпусу машины, приводящие к увеличению постоянной времени контура возбуждения.

Вместе с тем ни одно из приведенных решений не обеспечивает заветного регулирования с постоянством мощности в широком диапазоне скоростей. При глубоком ослаблении поля момент падает обратно пропорционально квадрату скорости. Выбор типа электропривода для конкретного применения является многофакторной задачей.

Решение для гибридного транспорта на примере автобуса

Прежде всего, необходимо избавляться от механических дифференциалов. Редуктор должен быть встроен в двигатель, так как получить хорошие габариты и массу для безредукторного электропривода сложно. Решение может быть построено по принципу «мотор-колесо» или «мотор-полуось». Второй вариант, когда мотор крепится к корпусу и соединяется с колесом через карданную передачу хуже по габаритам, чем «мотор-колесо», однако имеет существенно меньшую неподрессоренную массу и может быть выгоднее при должной компоновке.

Индивидуальный привод на каждое колесо размещается в колесных арках и позволяет сделать пол низким на всем протяжении салона. Силовые преобразователи могут размещаться рядом под сидениями, либо на кры-

ше автобуса. Кроме того, индивидуальный привод обеспечивает качественную работу антиблокировочных и противобуксовочных систем и систем курсовой устойчивости.

Дизель-генераторная установка должна быть варьированной мощности в зависимости от предполагаемых условий эксплуатации. Например, для города не требуется мощность более 50% от суммарной мощности ведущих колес, а для рейсовых автобусов ее следует увеличить.

В городских условиях хорошо будет работать суперконденсаторный накопитель энергии, включающий в себя силовой преобразователь, согласующий уровень напряжения звена постоянного тока и суперконденсатора. Так в трансмиссии, разработанной в рамках НИР Крымск, заряда конденсатора хватает на преодоление около 500 метров пути, что составляет среднее расстояние между автобусными остановками в городе.

Если остановки будут оборудованы зарядными устройствами для суперконденсаторов, то можно отказаться от использования мощного дизель-генератора, оставив лишь установку мощностью в несколько кВт для электрического обогрева салона зимой и возможности гарантировано добраться до остановки при попадании автобуса в пробку.

Выводы

Отечественный гибридный, еще не появившись на свет, и электрический городской транспорт нуждается в глубокой модернизации. Для этого требуется реализация программы всесторонне решающей проблемы тяговой подсистемы, конструкции кузова и подвески, эргономики и дизайна. Повышение пропускной способности транспорта может быть обеспечено увеличением скорости посадки и высадки пассажиров за счет применения низкого пола по всей длине транспортного средства, однако это требует пересмотра, в том числе, системы оплаты проезда. То есть только при комплексном подходе возможно решение большей части проблем и выход на мировой уровень по

экономичности, пропускной способности и комфорту пассажиров.

Библиографический список

1. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Лашкевич М.М., Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением, Электротехника, изд. Знак, 2014, №2, с.54-60
2. Лашкевич М.М., Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями, диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Москва 2013, с.155
3. http://www.rosinform.ru/2013/07/17/konstruktory-vpk-sozdali-shassi-krymsk-s-gibridnoyenergoustanovkoy-dlya-perspektivnogo-bronetransportera_01/
4. Флоренцев С.Н., Экономичный экологичный городской гибридный автобус / С. Флоренцев, Л. Макаров, В. Менухов // Электронные компоненты. – 2008. – № 12. – С. 24-39.
5. Dr. Schäfer, Heinz, Wheel – Hub Drives versus Axle Drives
6. <http://www.proteanelectric.com/en/>
7. Gerling, D.; Dajaku, G.; Lange, B.: Electric Traction for Automobiles- Comparison of Different Wheel – Hub Drives, EVS 23. Anaheim California, December 2-5, 2007

Сведения об авторах

Анучин Алексей Сергеевич, к.т.н., зав. каф. АЭП ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», +74953627021, anuchinas@mpei.ru

Алямкин Дмитрий Иванович, к.т.н., ООО «НПФ Вектор»

Козаченко Владимир Филиппович, д.т.н., проф. каф. АЭП ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», ген. директор ООО «НПФ Вектор», +74953627151

Лашкевич Максим Михайлович, к.т.н., ООО «НПФ Вектор»

Остриров Вадим Николаевич, д.т.н., проф. каф. АЭП ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», ген. директор ООО НПФ «Цикл+», +74953627996